

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **ZAVRŠNI RAD**

Željko Kedmenec

Zagreb, rujan 2012.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Davor Ljubas

Student:

Željko Kedmenec

Zagreb, rujan 2012.

Izjavljujem da sam rad radio samostalno, uz veliku pomoć mentora prof.dr.sc. Davora Ljubasa i laboranta Marka Skozrita kojima se veoma zahvaljujem.

Srdačno se zahvaljujem i djelatnicima još dva laboratorija:

- Laboratoriju za nemetale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, posebno prof.dr.sc. Lidiji Ćurković i asistentici Marijani Majić Renjo, mag.ing. na ustupljenom uređaju i stručnoj pomoći kod mjerenja.
- HEP-ovom Centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju i voditeljici dr.sc. Mariji Trkmić te ostalim djelatnicima laboratorija.

Željko Kedmenec

## **Sažetak**

U današnje vrijeme kada se na tržištu pojavljuju motorna ulja različitih kvaliteta i namjena, potrebno je odabrati upravo ono koje će svakom vozilu osiguravati optimalno hlađenje motora uz što je moguće više prijeđenih kilometara. Kako je pojam viskoznosti jedan od glavnih faktora kvalitete ulja, pokušat ćemo na temelju eksperimenta izmjeriti viskoznost prema raspoloživim normama s detaljnim opisivanjem postupka, te utvrditi eventualna odstupanja teorijskih od eksperimentalnih rezultata. Da bi se osigurala provjera mjernih rezultata, odnosno kvaliteta provedenog eksperimenta napravljena je usporedba rezultata mjerenja viskoznosti 4 različita motorna ulja u dogovoru s akreditiranim laboratorijem za takva mjerenja u Republici Hrvatskoj.

## Sadržaj

SAŽETAK .....	I
SADRŽAJ .....	II
POPIS OZNAKA I KRATICA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS DIJAGRAMA .....	V
POPIS SLIKA .....	VI
1. UVOD .....	1
2. MOTORNA ULJA.....	2
2.1. KLASIFIKACIJA ULJA .....	3
2.1.1. API klasifikacija.....	3
2.1.2. SAE klasifikacija .....	5
2.2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE MOTORNIH ULJA.....	6
2.2.1. Viskoznost motornih ulja .....	6
2.2.2. Indeks viskoznosti.....	8
2.2.3. Stinište.....	8
2.2.4. Ostale karakteristike mazivih ulja.....	8
2.2.4.1. Anilinska točka .....	8
2.2.4.2. Određivanje vlage u ulju .....	9
2.2.4.3. Plamište ulja [8] .....	10
2.2.5. Newtonske i ne-newtonske tekućine.....	11
3. ODREĐIVANJE DINAMIČKE VISKOZNOSTI .....	13
3.1. PRINCIP RADA ROTACIJSKOG VISKOZIMETRA [7].....	14
4. MJERENJE U LABORATORIJU FSB-A .....	17
4.1. POSTUPAK PRORAČUNA KINEMATIČKE VISKOZNOSTI.....	21
4.2. REZULTATI LABORATORIJSKIH MJERENJA I OBRADE PODATAKA .....	23
4.2.1. Uzorak Shell Helix ultra 5W-40 .....	23
4.2.2. Uzorak INA MOVE SAE 5W-30 .....	26
4.2.3. Uzorak INA ALFA D SAE 20.....	29
4.2.4. Uzorak INA DELTA SAE 15W-40 .....	32
5. MJERENJE U AKREDITIRANOM LABORATORIJU RH.....	35
6. ZAKLJUČAK .....	38
7. LITERATURA .....	39

## **Popis oznaka i kratica**

SAE - Society of automotive engineers

INA - Industrija nafte

API - Američki institut za naftu

GM - General Motors

ASTM- American Society for Testing & Materials

CCS- Cold Cranking Simulator

DIN - Deutsches Institut für Normung

HEP- Hrvatska elektroprivreda

## Popis tablica

Tablica 1: Klase prema uvjetima u eksploataciji .....	3
Tablica 2: Klasifikacija ulja za motorna vozila prema viskoznosti (SAE) .....	6
Tablica 3: Rezultati mjerenja i proračuna uzorka Shell Helix ultra .....	23
Tablica 4: Rezultati mjerenja i proračuna uzorka INA MOVE .....	26
Tablica 5: Rezultati mjerenja i proračuna uzorka INA ALFA D .....	29
Tablica 6: Rezultati mjerenja i proračuna uzorka INA DELTA .....	32
Tablica 7: Rezultati mjerenja kinematičke viskoznosti, akreditirani laboratorij....	36
Tablica 8: Usporedba rezultata laboratorijskih mjerenja .....	36
Tablica 9: Odstupanja rezultata FSB-a i HEP-a .....	37

## Popis dijagrama

Dijagram 1: Prikaz viskoznosti prema vrsti fluida .....	12
Dijagram 2: Dinamička viskoznost uzorka 1, temperatura 28,5 °C.....	23
Dijagram 3: Dinamička viskoznost uzorka 1, temperature 40°C.....	24
Dijagram 4: Dinamička viskoznost uzorka 2, temperatura 27 °C.....	26
Dijagram 5: Dinamička viskoznost uzorka 2, temperature 40 C .....	27
Dijagram 6: Dinamička viskoznost uzorka 3, temperatura 26,72 °C.....	29
Dijagram 7: Dinamička viskoznost uzorka 3, temperature 40 C .....	30
Dijagram 8: Dinamička viskoznost uzorka 4, temperatura 26,85 °C.....	32
Dijagram 9: Dinamička viskoznost uzorka 4, temperature 40 C .....	33
Dijagram 10: Usporedba rezultata laboratorijskog mjerenja.....	37



## Popis slika

Slika 1: Dinamika nestlačivog Newtonskog fluida .....	7
Slika 2:Postupak određivanja anilinske točke .....	9
Slika 3:Određivanje vlage u ulju .....	9
Slika 4: Određivanje točke plamišta ulja po Marcussonu .....	10
Slika 5:Rotacijski viskozimetar .....	13
Slika 6: Rotacijski viskozimetar-princip rada .....	14
Slika 7: Ekscentričnost cilindra (b) .....	16
Slika 8: Pojava turbulentnog strujanja (e).....	16
Slika 9: Precizna mjerna vaga.....	17
Slika 10: Uzorci u mjernim tikvicama.....	18
Slika 11: Mjerenje viskoznosti na sobnoj temperaturi.....	19
Slika 12: Temperiranje uzorka.....	20
Slika 13: Brookfield DV3 ULTRA, ponavljanje mjerenja.....	21
Slika 14: Krivulja viskoznosti prema Waltherovim formulama .....	22
Slika 15: Automatski viskozimetar MP-480, Walter Herzog .....	35

# 1. Uvod

U doba kada svijet čine strojevi različitih tipova i namjena, svi su oni načinjeni od osnovnih mehanizama konstrukcijskih elemenata. U svim tim elementima prisutno je trenje, otpor kretanju, koje ima za posljedicu zagrijavanje cijelog elementa uslijed pretvaranja izgubljene mehaničke energije u toplinu. Na tim mjestima dolazi do trošenja tarnih površina te ako se ne poduzmu potrebne mjere sprječavanja dolazi do drastičnih posljedica razaranja stroja. Zadatak inženjera je da primjeni potrebne vještine te osigura siguran, ekonomičan i nesmetan rad strojeva. Cilj ovog završnog rada je mjerenjem viskoznosti utvrditi postoje li odstupanja teorijskih od eksperimentalnih rezultata mineralnih i sintetičkih ulja, te rezultate mjerenja potkrijepiti s rezultatima određivanja viskoznosti u motornih ulja u akreditiranom laboratoriju. Mjerenje viskoznosti obavlja se na rotacijskom viskozimetru, uz prethodno temperirano ulje na 20 te na 40 °C.

## 2. Motorna ulja

Sva se motorna ulja sastoje od baznog ulja koje je definiranog sastava i karakteristika. Na osnovnu se bazu dodaju različiti aditivi kako bi se poboljšala svojstva te ulje bilo primjenjivo različitim uvjetima u toku rada strojeva. Neka osnovna fizikalno-kemijska svojstva ulja su dobra moć omašćivanja mazivih površina, velika adhezija i kohezija, neagresivnost na metale i brtve radnih strojeva, otpornost na vodu i vlagu u pojedinim slučajevima, te jedna od glavnih značajki što manja ovisnost viskoziteta o temperaturi. Zbog tih uvjeta, koji se postavljaju pred mineralna ulja, postoje aditivi različitih zadaća. Prema njihovim karakteristikama u ulogama možemo ih podijeliti u sljedeće osnovne skupine:

- a) Sredstva za poboljšanje indeksa viskoznosti smanjuju promjene viskoznosti u odnosu na promjenu temperature.
- b) Sredstva za sniženje stiništa snizuju najmanju temperaturu na kojoj ulje pokazuje svojstvo tečenja.
- c) Oksidacijski inhibitori usporavaju i umanjuju procese oksidacije ugljikovodika u mazivim uljima.
- d) Disperzanti koji sprječavaju taloženje oksidacijskih produkata, drže ih suspendiranima te štite motor i njegove dijelove.
- e) Sredstva protiv pjenjenja koja sprječavaju pojavu pjene koja može biti uzrok prestanka podmazivanja ili brže oksidacije.

Osim mineralnih motornih ulja danas se sve više primjenjuju sintetička motorna ulja koja odlikuju malom promjenom viskoznosti te dobrom sposobnosti podmazivanja u širokom temperaturnom rasponu. Za postizanje dobrih svojstava sintetičkih ulja potrebno je razvijati i posebne vrste aditiva, jer je sama osnova sintetičkih ulja osjetljiva na pojedine vrste aditiva. Osnovne prednosti su visoka oksidacijska i termička stabilnost, niski sadržaj koksa, niska isparljivost, teža zapaljivost.

## 2.1. Klasifikacija ulja

Sve veće potrebe za poboljšanjem radnih karakteristika kako bi se postigla optimalna svojstva podmazivanja i hlađena strojeva dovela su do klasificiranja ulja te podjele na kategorije za Ottove i dizelske motore. Prvu klasifikaciju ulja, prema viskozitetu, uvelo je Društvo američkih automobilskih inženjera SAE (Society of Automotive Engineering) 1911. godine. SAE klasifikacija dijeli se u dvije osnovne skupine: monogradna (sezonska), koja se moraju mijenjati prema godišnjim dobima, te multigradna koja se koriste tokom cijele godine. Nakon toga je 1951. godine Američki institut za naftu API uveo novu klasifikaciju, te je 1972. priznata i u Europi. Postoje još i interne klasifikacije pojedinih proizvođača automobila Fiat, Ford, GM, vojne klasifikacije motornih ulja koje su našle široku primjenu i u praksi, u komercijalne svrhe.

### 2.1.1. API klasifikacija

Klasifikacija podijeljena prema uvjetima u eksploataciji:

- a) Najblaži: ulja s minimumom zaštite od stvaranja depozita, trošenja i korozije.
- b) Najoštriji: ulja za najoštrije uvjete rada, sa najvećom zaštitom motora.

Sustav klasifikacije podijeljen je po slovima za Ottove motore s oznakom „S“, čini ga 10 klasa, te za dizelske motore s oznakom „C“, čini ga 9 klasa. Sustav je otvoren te se može proširivati.

#### Tablica 1: Klase prema uvjetima u eksploataciji

S –kategorija za četverotaktne Ottove motore

API	SA,SB I SC	zastarjela i nisu u uporabi
API	SD	za Ottove motore proizvedene od 1968. do 1970.
API	SE	za Ottove motore proizvedene od 1972. do 1980.
API	SF	za Ottove motore proizvedene od 1980. do 1989.
API	SG	za Ottove motore proizvedene od 1989. do 1994.
API	SH	za Ottove motore proizvedene od 1994. do 1996.
API	SJ	za Ottove motore proizvedene od 1996. do 2001.
API	SL	za Ottove motore proizvedene od 2001. do 2004.

---

API SM	za Ottove motore proizvedene od 2004. do 2010.
API SN	za Ottove motore proizvedene od 2011. na dalje.

C – kategorija ulja za Diesel motore

API CA i CB	zastarjela i više se ne proizvode
API CC	za dizel-motore proizvedene od 1961. do 1970.
API CD	za dizel-motore proizvedene od 1970. do 1983.
API CE	za dizel-motore proizvedene od 1983. do 1990.
API CF-4	za dizel-motore proizvedene nakon 1994., s posebnim aditivima, sa ili bez turbopunjača, povećana zaštita protiv trošenja, starenja i korozije
API CG-4	za dizel-motore proizvedene nakon 1998., koji rade na povišenim radnim temperaturama, pri velikim opterećenjima, kontroliraju stvaranje taloga i čađi
API CH-4	za motoru, za najveća opterećenja EUR 1, EUR 2 i EUR 3 motore.
API CI-4	za dizel-motore nakon 2002. godine, dizel motori velikih brzina dizajnirani za nove emisijske standarde
API CJ-4	predstavljani 2006. godine za motore velikih brzina, sa poštivanjem emisijskih normi od 2007. godine.

### 2.1.2. SAE klasifikacija

Klasifikacija koja predstavlja jedan od najraširenijih sustava klasifikacije maziva u automobilske industriji i prometu. Najraširenija klasifikacija koja uzima u obzir viskoznost ulja je klasifikacija prema SAE- Society of Automotive Engineers. Za motorna ulja primjenjuje se norma SAE J300 čiji tablični podaci su navedeni u tablici 2. Kod monogradnih ulja za eksploataciju na niskim temperaturama propisan je maksimalni viskozitet te minimalni viskozitet na 100 °C. Označuje se oznakom W. Kod primjene u ljetnom razdoblju propisan je minimalni i maksimalni viskozitet na 100 °C. Za multigradna ulja nije potrebna zamjena ulja u jesen i proljeće. Označavaju se sa 2 broja, ulja čiji viskozitet kod niskih temperatura udovoljava propisima za zimska ulja W, a kod 100 °C zahtjevima za ljetna. Prema takvoj klasifikaciji definiraju se dvije kategorije viskoznosti motornih ulja:

- a) Gradacije označene slovom W definirane su:
    - 1. Maksimalnom dinamičkom viskoznošću, CCS uređajem prema proceduri ASTM D 2602
    - 2. Najvećom graničnom temperaturom pumpabilnosti, ASTM D 3829
    - 3. Minimalnom kinematičkom viskoznošću u  $\text{mm}^2/\text{s}$  na 100 °C, prema ASTM D 445
  - b) Gradacije koje ne sadrže slovo W definirane su određivanjem kinematičkog viskoziteta u  $\text{mm}^2/\text{s}$  na 100 °C prema ASTM D 445. Postoji mogućnost da neko ulje zadovolji zahtjevima više od jedne W gradacije, pa se onda označuje najmanjom W gradacijom.
- Ulje također može odgovarati gradaciji bez slova W, npr. SAE 40, te je takvo ulje multigradno s oznakom npr. 5W-40.

**Tablica 2: Klasifikacija ulja za motorna vozila prema viskoznosti (SAE)**

SAE viskoznost motornih ulja DIN 51 511					
SAE klasa	maksimalna viskoznost		maks. granica pumpabilnosti	viskoznost na 100°C mm <sup>2</sup> /s	
	mPa	°C		min.	maks.
0W	3250	-30	-35	3.8	-
5W	3500	-25	-30	3.8	-
10W	3500	-20	-25	4.1	-
15W	3500	-15	-20	5.6	-
20W	4500	-10	-15	5.6	-
25W	6000	-5	-10	9.3	-
20	-	-	-	5.6	<9.3
30	-	-	-	9.3	<12.5
40	-	-	-	12.5	<16.3
50	-	-	-	16.3	<21.9
60*	-	-	-	21.9	<26.1
*samo SAE J300					

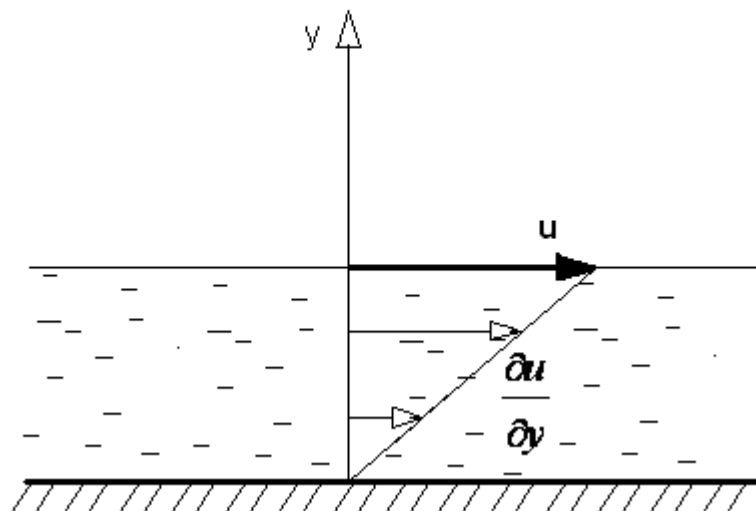
## 2.2. Osnovne karakteristike motornih ulja

### 2.2.1. Viskoznost motornih ulja

Viskoznost je najvažnije svojstvo svih mazivih ulja[4], a predstavlja mjeru unutrašnjeg trenja koje djeluje kao otpor na promjenu položaja molekula pri strujanju tekućina kada na njih djeluje smično naprezanje. S porastom temperature vrijednost opada, a manje promjene viskoznosti s povišenjem temperature određuju samu kvalitetu ulja. Uobičajeno je da se njena vrijednost iskazuje za tri različite temperaturne vrijednosti, 293 K, 323 K i 373 K. Njena vrijednost i kvaliteta u današnjem svijetu ima veoma važnu ulogu. Niža vrijednost viskoznosti označava manji otpor mazivog ulja, što se primjerice očituje manjim gubicima snage motora. S druge pak strane viša viskoznost bolje štiti motor i njegove vitalne dijelove od habanja. Stoga se teži poboljšanju i idealizaciji viskoznosti ovisno o primjeni.

Postoje različite vrste viskoznosti [5] :

- a) Dinamička viskoznost je koeficijent unutrašnjeg trenja čestica ulja te određuje dinamiku nestlačivog newtonowskog fluida. Izražava se u jedinici  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ . Ako se fluid sa viskoznosti od  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  stavi između dvije ploče, te se jedna ploča gurne tangencijalno od  $1 \text{ Pa}$ , ploča će preći jednaku debljinu slojeva između ploča u  $1 \text{ s}$ .
- b) Kinematička viskoznost je specifični koeficijent unutrašnjeg trenja ulja i predstavlja omjer dinamičke viskoznosti i specifične gustoće ulja. Izražava se u jedinicama  $\text{m}^2/\text{s}$  ili  $\text{mm}^2/\text{s}$ .
- c) Volumenska viskoznost određuje dinamiku newtonskog fluida.



**Slika 1: Dinamika nestlačivog Newtonskog fluida**



### **2.2.2. Indeks viskoznosti**

Karakteristika mazivog ulja koja je pogodna za brzo, osnovno ocjenjivanje viskozno-temperaturnog ponašanja ulja[5]. U ovisnosti o temperaturi opisuje promjenu kinematičke viskoznosti ulja, te time određuje i kvalitetu samog ulja. Sustav određivanja temelji se na dva niza standardnih mazivih ulja različitih viskoziteta:

- a) L („low“) ulje s indeksom viskoznosti 0, pokazuje izrazito veliku ovisnost viskoziteta o temperaturi
- b) H („high“) ulje s indeksom viskoznosti 100 prikazuje malu ovisnost viskoziteta o temperaturi

Svakodnevnim poboljšanjem kvalitete ulja korištenjem različitih aditiva, današnja vrijednost indeksa viskoznosti daleko premašuje tu skalu. Tako se kod sintetskih ulja ta vrijednost penje i preko 400.

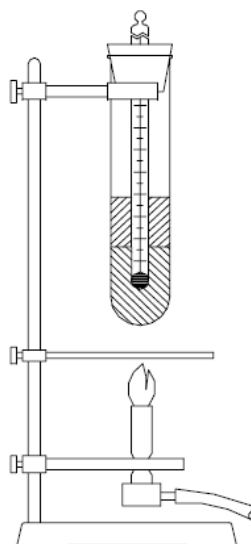
### **2.2.3. Stinište**

Hlađenjem mjernog uzorka zagrijanog na početnu temperaturu se svaka 3 °C ispituju svojstva tečenja, te se prati temperatura ispitivanog uzorka kod koje se još uvijek opaža tečenje[4]. Ovakva karakteristika veoma je bitna u podnebljima sa niskim temperaturama. Potrebno je osigurati da ulje zadrži potrebna radna svojstva kako bi se spriječila moguća šteta na motoru.

### **2.2.4. Ostale karakteristike mazivih ulja**

#### **2.2.4.1. Anilinska točka**

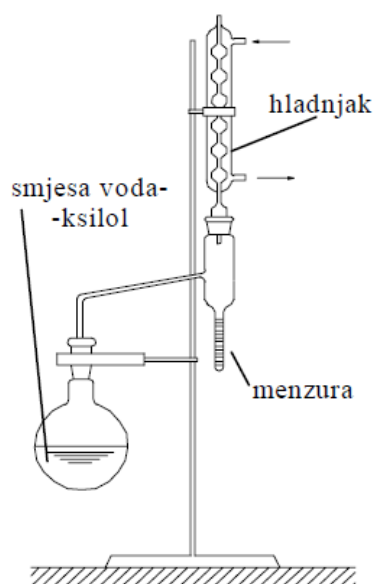
Predstavlja temperaturu kod koje dolazi do razdvajanja homogene smjese jednakih volumena anilina i uzorka, pri ohlađivanju, na dvije jasno odijeljene faze[4]. Ta je temperatura dosta visoka jer maziva ulja imaju pretežito parafinsku bazu ( $A_t \approx 100$  °C).



**Slika 2:Postupak određivanja anilinske točke**

#### **2.2.4.2. Određivanje vlage u ulju**

Određivanje se provodi destilacijom sa ksiloilom. Destilira se 50g ulja sa 100g ksiloila do konstantnog volumena prodestilirane vode[4]. Voda isparena iz ulja zajedno sa parama ksiloila dolazi do hladnjaka, kondenzira se i skuplja na dnu menzure za skupljanje kondenzata. Sadržaj vode se očitava na samoj menzuri jer se jasno vidi meniskus koji odvaja vodu (veće gustoće) od ksiloila.

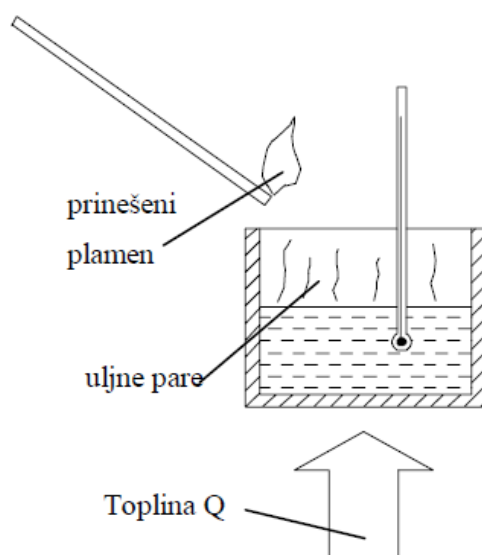


**Slika 3:Određivanje vlage u ulju**

### 2.2.4.3. Plamište ulja [8]

Točka paljenja ili plamište mazivog ulja predstavlja najnižu temperaturu na kojoj se pod utvrđenim uvjetima ispitivanja događa prvo zapaljenje smjese uljnih para sa zrakom, a da pritom ne slijedi daljnje gorenje. Daljnje zagrijavanje ulja i stvaranje dovoljnih količina pare koje će podržavati gorenje duže od 5 s znači da je postignuta temperatura gorišta, koja je za motorna uljaobično 20 do 30 °C viša od plamišta. Koriste se dvije osnovne metode:

- po *Marcussonu*- otvoreni lončić, za ulja s plamištem iznad 100 °C
- po *Pensky-Martensu*- zatvoreni lončić za motorna i loživa ulja s plamištem ispod 100 °C.



Slika 4: Određivanje točke plamišta ulja po Marcussonu

### 2.2.5. Newtonske i ne-newtonske tekućine

U newtonskim fluidima viskozna naprezanja su linearno razmjerna brzini deformacije fluida. Koeficijent razmjernosti se naziva dinamička viskoznost fluida [9].

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y}, \text{ gdje je}$$

$\tau$  - tangencijalno naprezanje koje trpi fluid

$\eta$  – viskoznost, konstanta proporcionalnosti

$\frac{\partial u}{\partial y}$  - gradijent brzine okomit na pravac tangencijalnog naprezanja

Newtonski fluid održava konstantnu viskoznost u svakom sloju smicanja, te nastavlja tok bez obzira na sile koje djeluju na njega. Kod ne-newtonskih fluida miješanje može stvoriti prazninu ili uzrokovati stanjivanje fluida, uzrokujući veći tok. Takva obilježja imaju tekućine poput majoneze, pudinga ili poškrobljene vode. Ako je viskoznost u cijelom fluidu konstantna i fluid je nestlačiv, jednačina koja opisuje posmično naprezanje u Kartezijevom koordinatnom sustavu glasi:

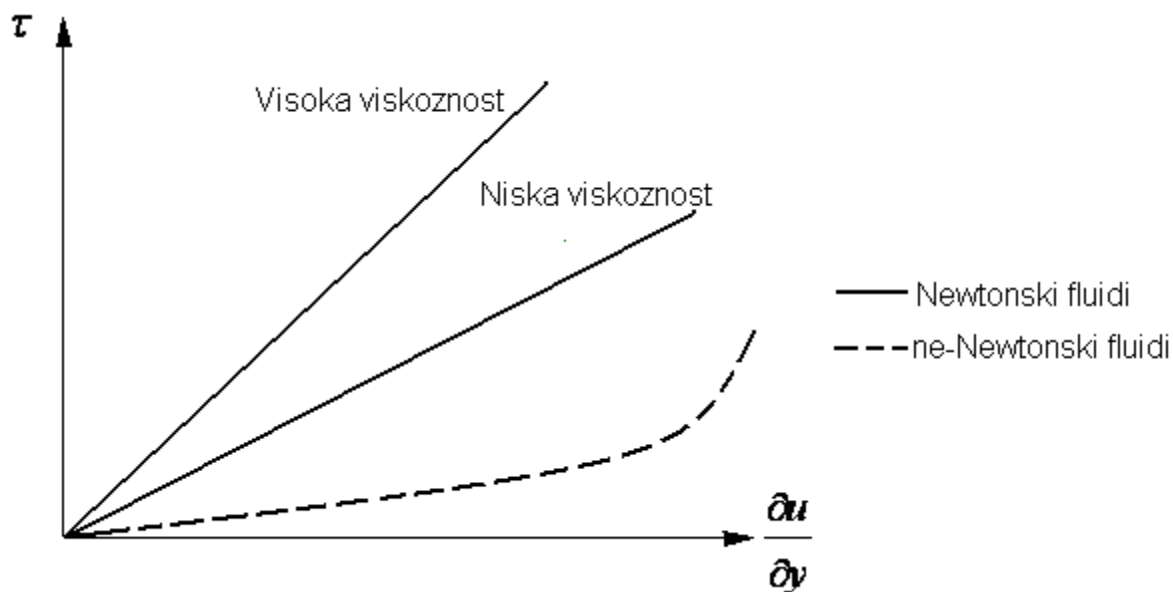
$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \text{ te pripadajući tenzor}$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \text{ gdje je:}$$

$\tau_{ij}$  posmično naprezanje na i-toj plohi elementa fluida u j-tom smjeru

$u_i$  je brzina u i-tom smjeru

$x_j$  je koordinata j-tog smjera



**Dijagram 1: Prikaz viskoznosti prema vrsti fluida**

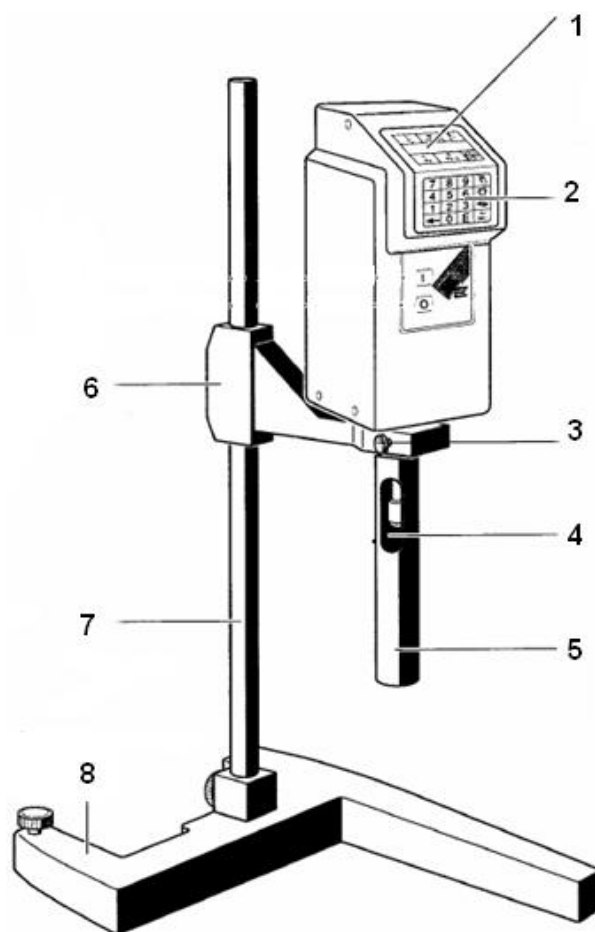
Kod ne-newtonskih tekućina viskoznost se mijenja ovisno o primjenjenoj sili te je nije moguće dobro definirati, time takvi fluidi ne zadovoljavaju ovu jednadžbu. Najbolje se definiraju preko drugih reoloških svojstava koja definiraju veze između tenzora posmičnog naprezanja i deformacija pri raznim uvjetima toka.

### 3. Određivanje dinamičke viskoznosti

Mjerenje dinamičke viskoznosti uzoraka može se provesti na više načina:

- a) Empirički po Engleru
- b) Apsolutni viskozitet po Höppleru
- c) Vogle-Ossagovim viskozimetrom
- d) Cannon-Fenske viskozimetrom
- e) Rotacijskim viskozimetrom

U ovom radu korištena je metoda određivanja viskoznosti rotacijskim viskozimetrom koji radi na principu mjerenja momenta te pretvaranja te vrijednosti u dinamičku viskoznost pomoću mikroprocesora.



- 1. Digitalni ekran s prikazom:
  - a) Temperature
  - b) Momenta
  - c) Viskoznosti
  - d) Posmičnog naprezanja
  - e) Mjernog sustava
- 2. Tipkovnica
- 3. Pričvrsni vijak
- 4. Kontrolni otvor za razinu uzorka
- 5. Cilindar sa mjernim viskom
- 6. Nosač mjernog instrumenta
- 7. Stalak
- 8. Masivno postolje

**Slika 5: Rotacijski viskozimetar**

Tehnički podaci [6]:

- a) Raspon momenta: 0,25 do 7.5 mNm
- b) Brzina vrtnje: 5-1000 min<sup>-1</sup>
- c) Točnost:  $\pm 0,5\%$  od stvarne vrijednosti
- d) Raspon viskoznosti: 1-10<sup>6</sup> mPa
- e) Elektromotor: 220V/50Hz

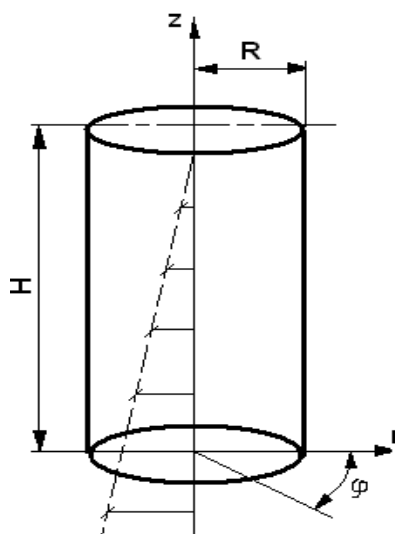
### 3.1. Princip rada rotacijskog viskozimetra [7]

Mjerenje dinamičke viskoznosti provodilo se na dvama uređajima:

- a) Uređaju proizvođača Mettler, tip RM 180
- b) Uređaj proizvođača Brookfield, tip DV3 ULTRA

Oba uređaja rade na sličnom principu koji se detaljnije objašnjava u nastavku.

Mjerna glava i mjerna cijev čvrsto su povezane, a mjerna jedinica pokretana je snagom elektromotora. U mjernu cijev ulivena je potrebna količina uzorka, a za mjerenje je primjenjen pločasti visak koji odgovara rasponu viskoznosti za konkretni slučaj. Kod različitih brzina vrtnje mjernog viska izmjeri se odgovarajući moment, te se s tim vrijednostima pomoću mikroprocesora iščitava dinamička viskoznost.



**Slika 6: Rotacijski viskozimetar-princip rada**

Formule za određivanje viskoznosti uzorka:

$$\tau = \frac{T}{2\pi R_b^2 L}$$

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{2R_c^2}{R_c^2 - R_b^2} \right) \omega$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Gdje je:

$T$  - izmjereni moment

$\omega$  - izmjerena kutna brzina viska (rad/s)

$R_c$  - polumjer spremnika

$R_b$  - polumjer viska

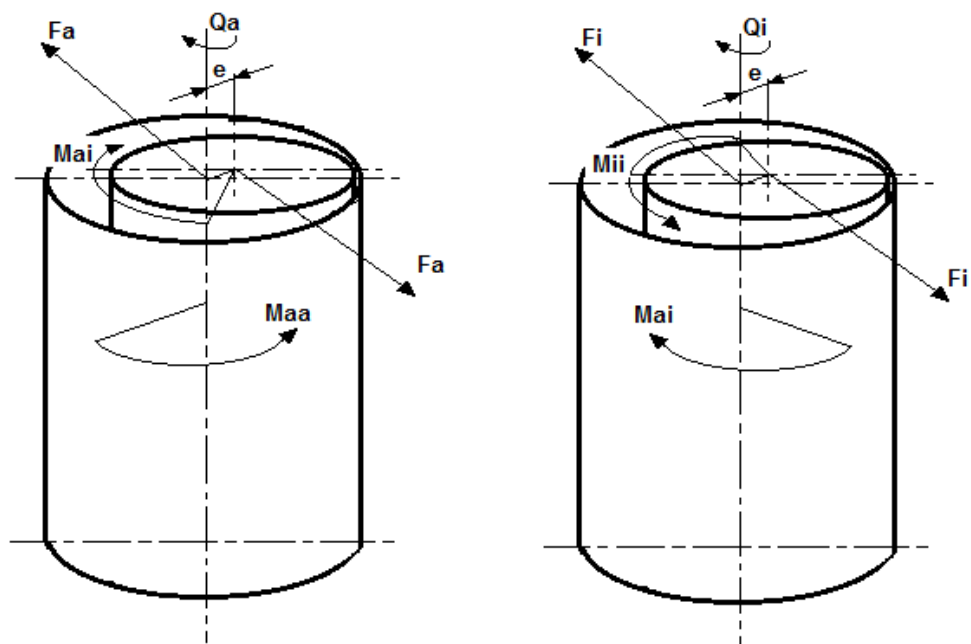
$L$  - efektivna dužina viska

Prema DIN 53 018 postoje faktori koji mogu utjecati na ishod mjerenja te ih je potrebno eliminirati kako bi se dobili pouzdani rezultati. [7].

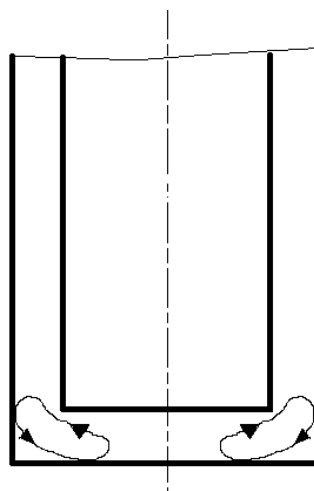
Faktori koji utječu na mjerenje:

- a) Utjecaj površine mjernog viska
- b) Greška zbog ekscentričnog položaja cilindra-momenti unutarnje i vanjske strane različiti jedni od drugih.
- c) Utjecaj temperaturnog širenja fluida- korigira se prema korekcijskim tablicama DIN 53 018 u ovisnosti o vrsti fluida.
- d) Dodatni okretni moment zbog trenja
- e) Granica stabilnosti- dolazi do pojave turbulentnog mješanja na čeonj površini mjernog viska.





Slika 7: Ekscentričnost cilindra (b)



Slika 8: Pojava turbulentnog strujanja (e)

## 4. Mjerenje u laboratoriju FSB-a

Na samom početku laboratorijskog rada treba pripremiti uzorke za mjerenje. Kako bi se odredila potrebna kinematička viskoznost, potrebno je mjerenjem odrediti dinamičku viskoznost te gustoću uzoraka te na kraju odrediti kinematičku viskoznost. Za određivanje gustoće koristi se mjerna tikvica volumena 100mL . Preciznom vagom izmjeri se masa prazne tikvice te nakon toga tikvice zajedno sa svakim pojedinim uzorkom.



**Slika 9: Precizna mjerna vaga**

Mjerenje se vršilo na 4 različita uzorka, s time da su dva mineralna a dva sintetička motorna ulja.

Korišteni uzorci ulja kod mjerenja:

Sintetičko ulje: a) Shell HELIX ultra 5W-40

b) INA MOVE SAE 5W-30

Mineralno ulje: a) INA ALFA D SAE 20

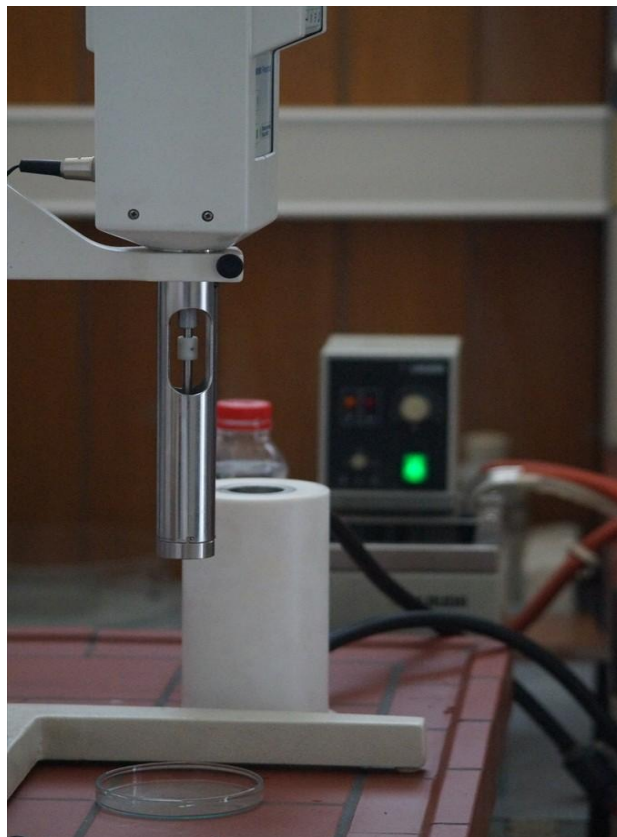
b) INA DELTA SAE 15W-40



**Slika 10: Uzorci u mjernim tikvicama**

Mjerenje vršimo na temperaturama 20 i 40 °C, te na sobnoj temperaturi koja je za vrijeme mjerenja bila izrazito visoka ( ~ 28 °C). Na sobnoj temperaturi ujedno je i izmjeren volumen uzorka te kasnije izračunata gustoću pojedinog uzorka na mjernim temperaturama prema DIN 51 757.

Mjerenje dinamičke viskoznosti uzoraka na sobnoj temperaturi relativno se brzo odvija jer nije bilo potrebe za postavljanjem mjernih temperatura kao kod sljedeće dvije vrijednosti. Za svaki pojedini uzorak potrebno je otprilike 30-tak minuta.



**Slika 11: Mjerenje viskoznosti na sobnoj temperaturi**

Nakon mjerenja na sobnoj temperaturi određivanje dinamičke viskoznosti obavlja se na temperaturi 20 °C. Kako bi se spustila temperaturu uzoraka na 20 °C koristi se kupka sa vodovodnom vodom. Daljnje mjerenje se provodilo na 40 °C.

Kod mjerenja na temperaturama koje nisu okolišne potrebno je mnogo strpljenja jer se dosta vremena potroši na podešavanje temperature, koja mora na mjernoj temperaturi biti konstantna minimalno 30 sekundi kako bi mjerenje bilo zadovoljavajuće točno. Dinamička viskoznost je i na točnoj temperaturi varirala na trećoj decimali te se od 3 očitane vrijednosti kao konačnu uzima srednja vrijednost.



**Slika 12: Temperiranje uzorka**

Mjerni se uzorak određene količine stavlja u mjernu cilindričnu posudu te se učvršćuje na mjerni instrument. Mjerni visak je u središtu te mu se os poklapa sa osi mjerne cilindrične posude. Zatim se uređaj spusti tako da mjerna cilindrična posuda sjedne u temperiranu posudu. Posuda je temperirana vodom koja struji oko stjenke, a voda se posebno priprema u kupki te se cijevima dovodi do posude. Za mjerenje dinamičke viskoznosti na 20 °C zbog problema ohlađivanja uzoraka vodovodnom vodom koristila se vodena kupka ohlađena ledom. Problem ujednačavanja bio je isti kao i kod 40 °C.

Kada se temperatura ustali u razdoblju od 30 sekundi očita se vrijednost dinamičke viskoznosti te zbog variranja zaokruži na srednju vrijednost. Uređaj kao i mjerni instrumenti se nakon svake promjene uzorka čiste najprije benzinom a zatim i acetonom te na kraju deterđentom kako ne bi došlo do miješanja uzoraka.

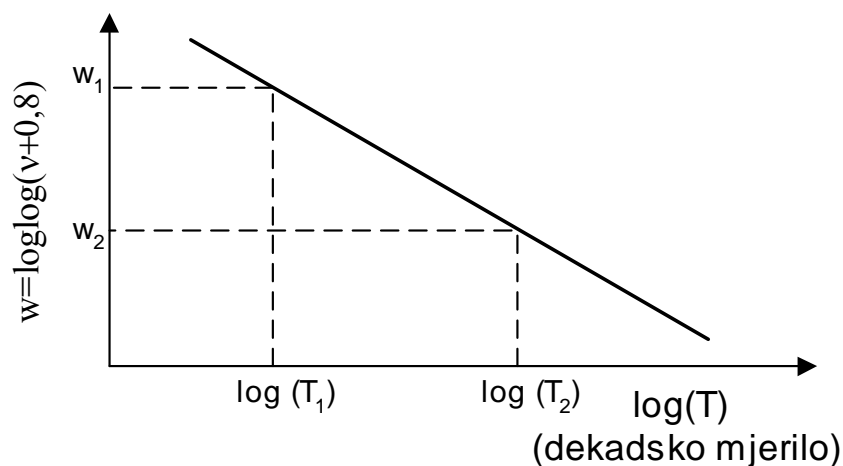
S ciljem postizanja što točnijih i vjerodostojnijih rezultata mjerenja dinamičke viskoznosti dodatno su svi uzorci odneseni na Katedru za materijale i tribologiju u Laboratorij za analizu materijala gdje su na drugom uređaju, slika 13, određene i provjerene vrijednosti dinamičke viskoznosti.



Slika 13: Brookfield DV3 ULTRA, ponavljanje mjerenja

#### 4.1. Postupak proračuna kinematičke viskoznosti

U laboratoriju je izmjerena dinamička viskoznost na sobnoj temperaturi i na  $40^{\circ}\text{C}$ , te je preračunata u kinematičku viskoznost pomoću specifične gustoće. Da bi se izračunala viskoznost kod drugih temperatura koje nismo mjerili koriste se Waltherove formule, koje daju ovisnost viskoznost-temperatura u linearnom obliku tako da je dovoljno poznavati viskoznost u dvije točke te se provlačenjem pravca kroz njih može pronaći vrijednost za kinematičku viskoznost za bilo koju drugu temperaturu. U konkretnom primjeru na  $50$  i  $100^{\circ}\text{C}$ .



**Slika 14: Krivulja viskoznosti prema Waltherovim formulama**

Specifična gustoća ulja izmjerena je na sobnoj temperaturi za pojedini uzorak ulja, pa se prema formulama u standardu DIN-u 51 757 određuje specifičnu gustoću na 15°C kako bi se mogla odrediti i za ostale temperature.

$$\alpha(15^{\circ}\text{C}) = \frac{K_0}{[\rho(15^{\circ}\text{C})]^2} + \frac{K_1}{\rho(15^{\circ}\text{C})}, \text{ gdje je}$$

$\alpha(15^{\circ}\text{C})$  - toplinski koeficijent rastezanja

$K_0, K_1$  - specifične konstante prema DIN-u 51 757

Volumenski korekcijski faktor izračunava se prema sljedećoj formuli:

$$\beta_t = \frac{\rho(t)}{\rho(15^{\circ}\text{C})} = \text{EXP}[-\alpha(15^{\circ}\text{C}) \cdot \Delta t \cdot (1 + \alpha(15^{\circ}\text{C}) \cdot 0,8 \cdot \Delta t)]$$

$\rho(t)$  - specifična gustoća na mjerenoj temperaturi [ kg/m<sup>3</sup>]

$\rho(15^{\circ}\text{C})$  - specifična gustoća na temperaturi 15°C [kg/m<sup>3</sup>]

$\Delta t$  - razlika mjerne temperature i 15 °C

## 4.2. Rezultati laboratorijskih mjerenja i obrade podataka

### 4.2.1. Uzorak Shell Helix ultra 5W-40

**Tablica 3: Rezultati mjerenja i proračuna uzorka Shell Helix ultra**

Temperatura [K]	Dinamička viskoznost ( $\eta$ ) [ $Pa \cdot s$ ]	Kinematička viskoznost ( $\nu$ ) [ $mm^2/s$ ]	Gustoća ( $\rho$ ) [ $kg/m^3$ ]
301,65	*0,115	136,89	*840,044
313	*0,073	87,66	832,765
323	0,0509	61,7	826,409
373	0,0132	16,7	794,307

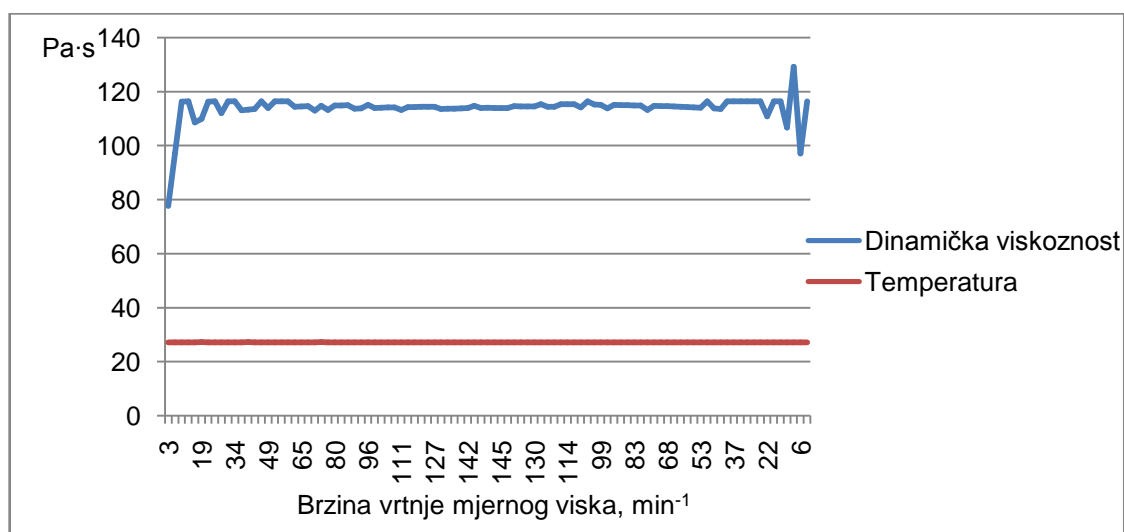
\*izmjerene vrijednosti

Za sobnu temperaturu 28,5 °C:

$$\rho_{st}^{°C} = \frac{m}{V} = \frac{0,08400444}{0,0001} = 840,0444 [kg/m^3]$$

$$\eta_{st}^{°C} = 0,115 [Pa \cdot s]$$

$$\nu_{st}^{°C} = \frac{\eta}{\rho} = 136,89 [mm^2 / s]$$



**Dijagram 2: Dinamička viskoznost uzorka 1, temperatura 28,5 °C**

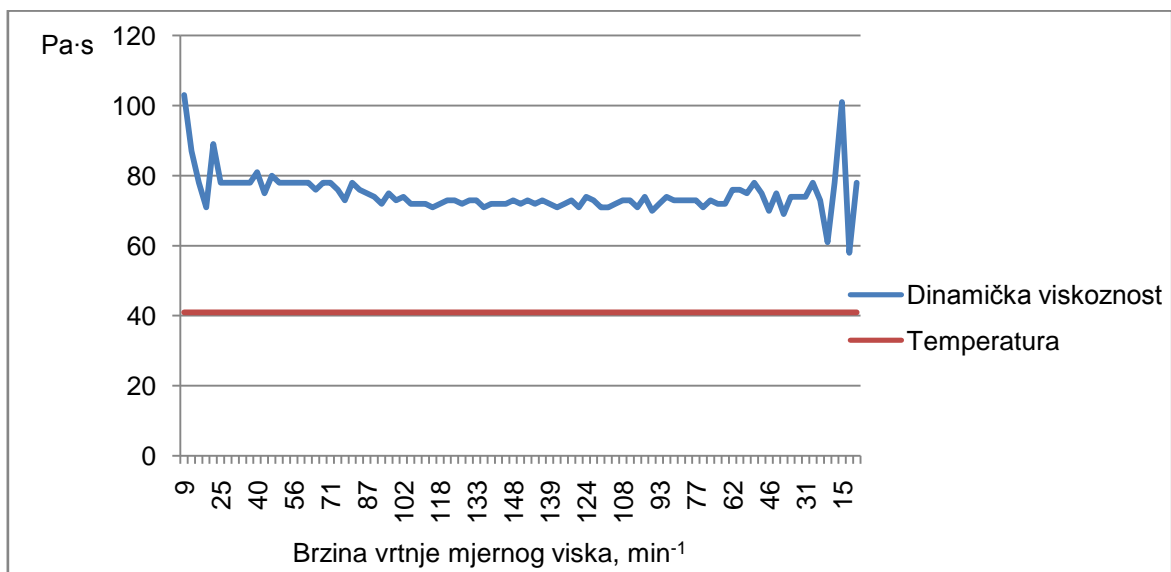


Za temperaturu 40 °C:

$$\rho_{40^{\circ}\text{C}} = 832,765 \left[ \text{kg/m}^3 \right]$$

$$\eta_{40^{\circ}\text{C}} = 0,073 \left[ \text{Pa} \cdot \text{s} \right]$$

$$\nu_{40^{\circ}\text{C}} = \frac{\eta}{\rho} = 87,66 \left[ \text{mm}^2 / \text{s} \right]$$



**Dijagram 3: Dinamička viskoznost uzorka 1, temperature 40°C**

$$T_1 = 301,65 \text{ K}$$

$$T_2 = 313 \text{ K}$$

$$\nu_{stoc} = 136,89 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$\nu_{40^{\circ}\text{C}} = 87,66 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$w_1 = \log \log(\nu_{stoc} + 0,8)$$

$$w_1 = 0,3302$$

$$w_2 = \log \log(\nu_{40^{\circ}\text{C}} + 0,8)$$

$$w_2 = 0,2893$$

Kinematička viskoznost na  $50^{\circ}\text{C}$  i  $100^{\circ}\text{C}$ 

$$w = \log \log(\nu + 0,8)$$

$$x_1 = \log T_1 = \log(301,65) = 2,4795$$

$$x_2 = \log T_2 = \log(313) = 2,49554$$

$$y_1 = w_1 = 0,3302$$

$$y_2 = w_2 = 0,2893$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1)$$

$$y - 0,3302 = -2,55625(x - 2,4795)$$

$$y = -2,55625x + 6,6684$$

$$x_3 = \log T_3 = \log(323) = 2,5092$$

$$x_4 = \log T_4 = \log(373) = 2,5717$$

$$y_3 = w_3 = -2,55625 \cdot 2,5092 + 6,6684 = 0,25426$$

$$y_4 = w_4 = -2,55625 \cdot 2,5717 + 6,6684 = 0,09449$$

$$w_3 = \log \log(\nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8) / \log^{-1}$$

$$10^{w_3} = \log(\nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8) / \log^{-1}$$

$$10^{10^{0,25426}} = \nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8$$

$$\nu_{50^{\circ}\text{C}} = 61,7 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$w_4 = \log \log(\nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8) / \log^{-1}$$

$$10^{w_4} = \log(\nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8) / \log^{-1}$$

$$10^{10^{0,09449}} = \nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8$$

$$\nu_{100^{\circ}\text{C}} = 16,7 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

Uzorak spada u sintetičko ulje sa pripadajućom gradacijom 5W-40. Prema tehničkim podacima proizvođača Shell [2], propisana kinematička viskoznost na  $100^{\circ}\text{C}$  kreće se u granicama od 12.5 do 16.3  $\text{mm}^2/\text{s}$ .

#### 4.2.2. Uzorak INA MOVE SAE 5W-30

Tablica 4: Rezultati mjerenja i proračuna uzorka INA MOVE

Temperatura [K]	Dinamička viskoznost ( $\eta$ ) [ $Pa \cdot s$ ]	Kinematička viskoznost ( $\nu$ ) [ $mm^2/s$ ]	Gustoća ( $\rho$ ) [ $kg/m^3$ ]
300,15	*0,103	121,37	*848,6174
313	*0,062	73,775	840,3925
323	0,0437	52,41	834,0375
373	0,01176	14,66	801,9404

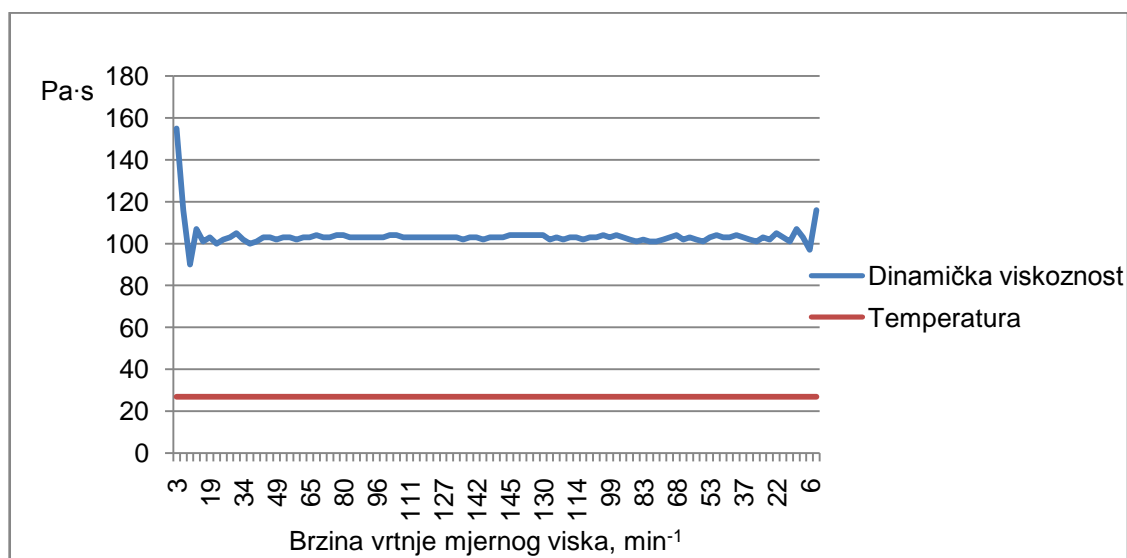
\*izmjerene vrijednosti

Za sobnu temperaturu 27 °C:

$$\rho_{st^{°C}} = \frac{m}{V} = \frac{0,08486174}{0,0001} = 848,6174 [kg/m^3]$$

$$\eta_{st^{°C}} = 0,103 [Pa \cdot s]$$

$$\nu_{st^{°C}} = \frac{\eta}{\rho} = 121,37 [mm^2 / s]$$



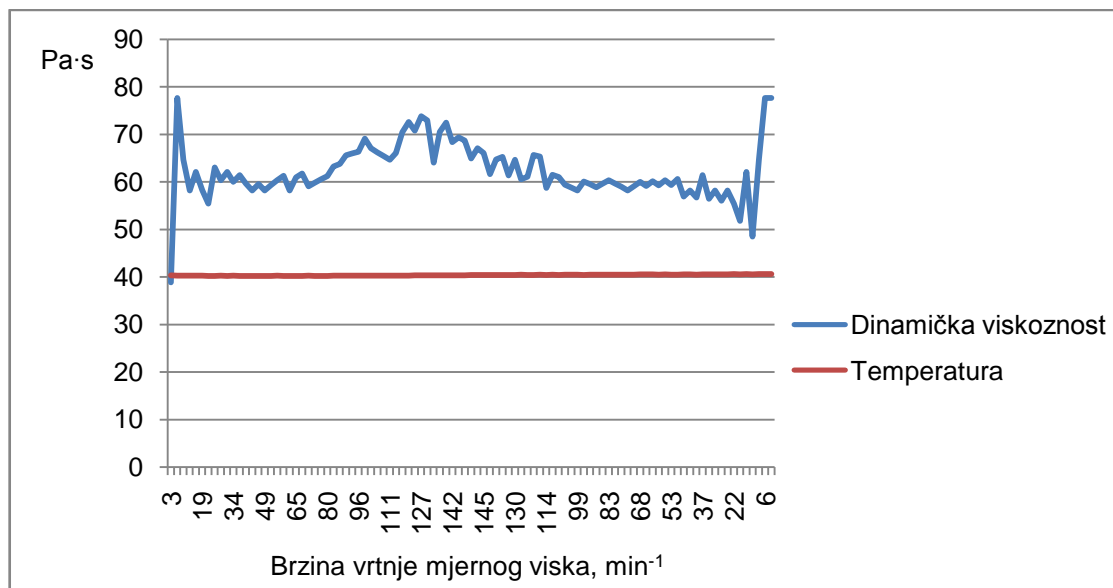
Dijagram 4: Dinamička viskoznost uzorka 2, temperatura 27 °C

Za temperaturu 40 °C:

$$\rho_{40^{\circ}\text{C}} = 840,39254 \left[ \text{kg/m}^3 \right]$$

$$\eta_{40^{\circ}\text{C}} = 0,062 \left[ \text{Pa} \cdot \text{s} \right]$$

$$\nu_{40^{\circ}\text{C}} = \frac{\eta}{\rho} = 73,775 \left[ \text{mm}^2 / \text{s} \right]$$



**Dijagram 5: Dinamička viskoznost uzorka 2, temperature 40 C**

$$T_1 = 300,15 \text{ K}$$

$$T_2 = 313 \text{ K}$$

$$\nu_{st^{\circ}\text{C}} = 121,37 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$\nu_{40^{\circ}\text{C}} = 73,775 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$w_1 = \log \log(\nu_{st^{\circ}\text{C}} + 0,8)$$

$$w_1 = 0,3195$$

$$w_2 = \log \log(\nu_{40^{\circ}\text{C}} + 0,8)$$

$$w_2 = 0,2724$$

Kinematička viskoznost na  $50^{\circ}\text{C}$  i  $100^{\circ}\text{C}$ 

$$w = \log \log(\nu + 0,8)$$

$$x_1 = \log T_1 = \log(300,15) = 2,47734$$

$$x_2 = \log T_2 = \log(313) = 2,49554$$

$$y_1 = w_1 = 0,3195$$

$$y_2 = w_2 = 0,2724$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1)$$

$$y - 0,3195 = -2,5879(x - 2,47734)$$

$$y = -2,5879x + 6,7306$$

$$x_3 = \log T_3 = \log(323) = 2,5092$$

$$x_4 = \log T_4 = \log(373) = 2,5717$$

$$y_3 = w_3 = -2,5879 \cdot 2,5092 + 6,7306 = 0,23704$$

$$y_4 = w_4 = -2,5879 \cdot 2,5717 + 6,7306 = 0,07529$$

$$w_3 = \log \log(\nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8)^{\log -1}$$

$$10^{w_3} = \log(\nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8)^{\log -1}$$

$$10^{10^{0,25426}} = \nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8$$

$$\nu_{50^{\circ}\text{C}} = 52,41 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$w_4 = \log \log(\nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8)^{\log -1}$$

$$10^{w_4} = \log(\nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8)^{\log -1}$$

$$10^{10^{0,07529}} = \nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8$$

$$\nu_{100^{\circ}\text{C}} = 14,66 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

Uzorak spada u sintetičko ulje sa pripadajućom gradacijom SAE 5W-30. Prema tehničkim podacima Ine[1], propisana kinematička viskoznost na  $100^{\circ}\text{C}$  kreće se u granicama od 11,5 do 12,5  $\text{mm}^2/\text{s}$ .

### 4.2.3. Uzorak INA ALFA D SAE 20

Tablica 5: Rezultati mjerenja i proračuna uzorka INA ALFA D

Temperatura [K]	Dinamička viskoznost ( $\eta$ ) [ $Pa \cdot s$ ]	Kinematička viskoznost ( $\nu$ ) [ $mm^2/s$ ]	Gustoća ( $\rho$ ) [ $kg/m^3$ ]
299,87	*0,179	202	*886,149
313	*0,098	111,65	877,7505
323	0,06554	75,21	871,3985
373	0,01484	17,68	839,3261

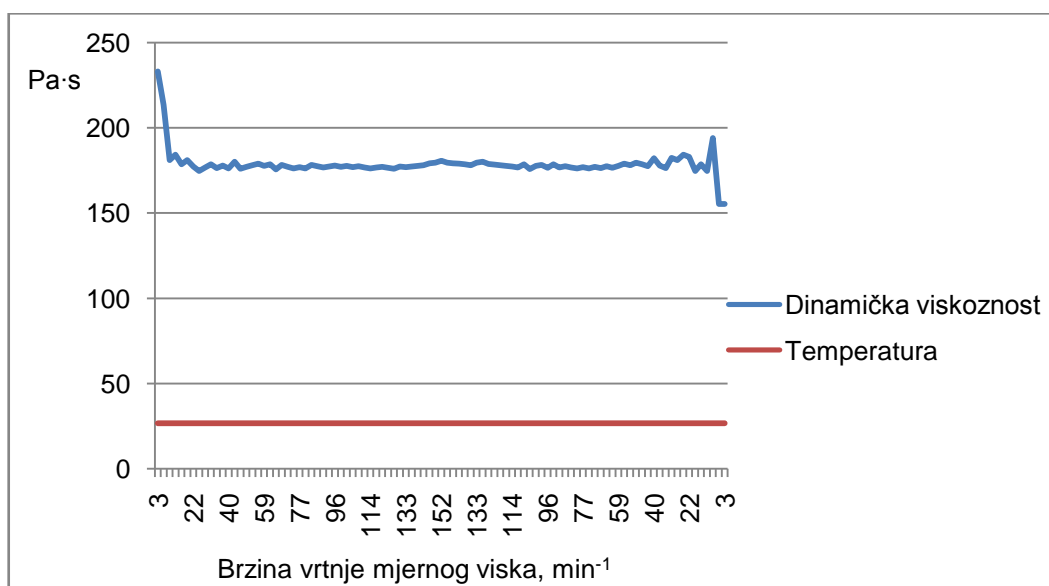
\*izmjerene vrijednosti

Za sobnu temperaturu 26,72 °C:

$$\rho_{st}^{°C} = \frac{m}{V} = \frac{0,0886149}{0,0001} = 886,149 [kg/m^3]$$

$$\eta_{st}^{°C} = 0,179 [Pa \cdot s]$$

$$\nu_{st}^{°C} = \frac{\eta}{\rho} = 202 [mm^2 / s]$$



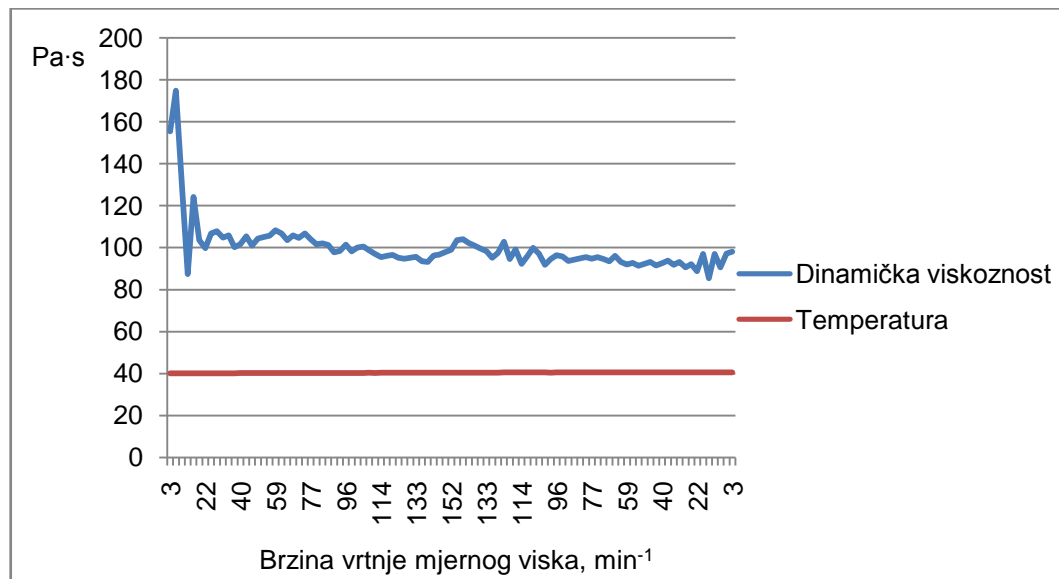
Dijagram 6: Dinamička viskoznost uzorka 3, temperatura 26,72 °C

Za temperaturu 40 °C:

$$\rho_{40^{\circ}\text{C}} = 877,7505 \left[ \text{kg/m}^3 \right]$$

$$\eta_{40^{\circ}\text{C}} = 0,098 \left[ \text{Pa} \cdot \text{s} \right]$$

$$\nu_{40^{\circ}\text{C}} = \frac{\eta}{\rho} = 111,65 \left[ \text{mm}^2 / \text{s} \right]$$



**Dijagram 7: Dinamička viskoznost uzorka 3, temperature 40 C**

$$T_1 = 299,87 K$$

$$T_2 = 313 K$$

$$\nu_{st^{\circ}C} = 202 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$\nu_{40^{\circ}C} = 111,65 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$w_1 = \log \log(\nu_{st^{\circ}C} + 0,8)$$

$$w_1 = 0,36306$$

$$w_2 = \log \log(\nu_{40^{\circ}C} + 0,8)$$

$$w_2 = 0,31195$$

Kinematička viskoznost na  $50^{\circ}\text{C}$  i  $100^{\circ}\text{C}$ 

$$w = \log \log(\nu + 0,8)$$

$$x_1 = \log T_1 = \log(299,87) = 2,47693$$

$$x_2 = \log T_2 = \log(313) = 2,49554$$

$$y_1 = w_1 = 0,36306$$

$$y_2 = w_2 = 0,31195$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1)$$

$$y - 0,36306 = -2,7464(x - 2,47693)$$

$$y = -2,7464x + 7,16563$$

$$x_3 = \log T_3 = \log(323) = 2,5092$$

$$x_4 = \log T_4 = \log(373) = 2,5717$$

$$y_3 = w_3 = -2,7464 \cdot 2,5092 + 7,16563 = 0,27436$$

$$y_4 = w_4 = -2,7464 \cdot 2,5717 + 7,16563 = 0,102713$$

$$w_3 = \log \log(\nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8) / ^{\log-1}$$

$$10^{w_3} = \log(\nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8) / ^{\log-1}$$

$$10^{10^{0,27436}} = \nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8$$

$$\nu_{50^{\circ}\text{C}} = 75,21 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$w_4 = \log \log(\nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8) / ^{\log-1}$$

$$10^{w_4} = \log(\nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8) / ^{\log-1}$$

$$10^{10^{0,102713}} = \nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8$$

$$\nu_{100^{\circ}\text{C}} = 17,68 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

Uzorak INA ALFA D spada u mineralno motorno ulje sa pripadajućom gradacijom SAE 20. Prema toj gradaciji propisana kinematička viskoznost na  $100^{\circ}\text{C}$  kreće se u granicama od 5,6 do 9,3  $\text{mm}^2/\text{s}$ .



#### 4.2.4. Uzorak INA DELTA SAE 15W-40

Tablica 6: Rezultati mjerenja i proračuna uzorka INA DELTA

Temperatura [K]	Dinamička viskoznost ( $\eta$ ) [ $Pa \cdot s$ ]	Kinematička viskoznost ( $\nu$ ) [ $mm^2/s$ ]	Gustoća ( $\rho$ ) [ $kg/m^3$ ]
300	*0,196	224,21	*874,187
313	*0,104	120,11	865,8693
323	0,068	79,112	859,5163
373	0,01435	17,339	827,4362

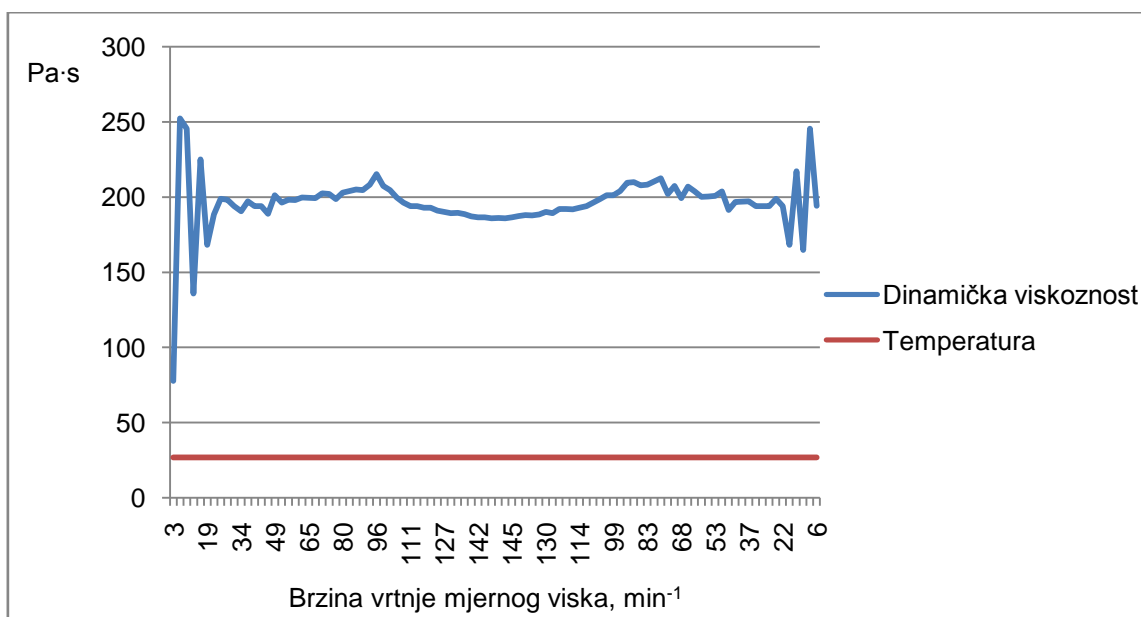
\*izmjerene vrijednosti

Za sobnu temperaturu 26,85 °C:

$$\rho_{st}^{\circ C} = \frac{m}{V} = \frac{0,0874187}{0,0001} = 874,187 [kg/m^3]$$

$$\eta_{st}^{\circ C} = 0,196 [Pa \cdot s]$$

$$\nu_{st}^{\circ C} = \frac{\eta}{\rho} = 224,21 [mm^2 / s]$$



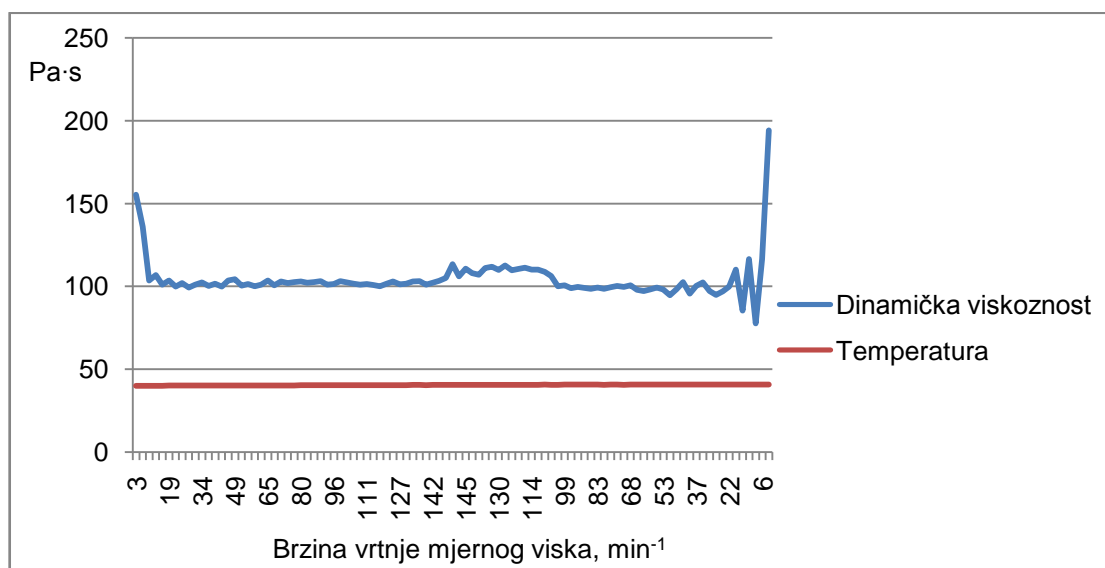
Dijagram 8: Dinamička viskoznost uzorka 4, temperatura 26,85 °C

Za temperaturu 40 °C:

$$\rho_{40^{\circ}\text{C}} = 865,86925 \left[ \text{kg/m}^3 \right]$$

$$\eta_{40^{\circ}\text{C}} = 0,104 \left[ \text{Pa} \cdot \text{s} \right]$$

$$\nu_{40^{\circ}\text{C}} = \frac{\eta}{\rho} = 120,11 \left[ \text{mm}^2 / \text{s} \right]$$



**Dijagram 9: Dinamička viskoznost uzorka 4, temperature 40 C**

$$T_1 = 300K$$

$$T_2 = 313K$$

$$\nu_{stoc} = 224,21 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$\nu_{40^{\circ}\text{C}} = 120,11 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$w_1 = \log \log(\nu_{stoc} + 0,8)$$

$$w_1 = 0,37147$$

$$w_2 = \log \log(\nu_{40^{\circ}\text{C}} + 0,8)$$

$$w_2 = 0,31858$$

Kinematička viskoznost na  $50^{\circ}\text{C}$  i  $100^{\circ}\text{C}$ 

$$w = \log \log(\nu + 0,8)$$

$$x_1 = \log T_1 = \log(300) = 2,47712$$

$$x_2 = \log T_2 = \log(313) = 2,49554$$

$$y_1 = w_1 = 0,37147$$

$$y_2 = w_2 = 0,31858$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1)$$

$$y - 0,37147 = -2,87134(x - 2,47712)$$

$$y = -2,87134x + 7,48412$$

$$x_3 = \log T_3 = \log(323) = 2,5092$$

$$x_4 = \log T_4 = \log(373) = 2,5717$$

$$y_3 = w_3 = -2,87134 \cdot 2,5092 + 7,48412 = 0,27935$$

$$y_4 = w_4 = -2,87134 \cdot 2,5717 + 7,48412 = 0,09989$$

$$w_3 = \log \log(\nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8) / ^{\log-1}$$

$$10^{w_3} = \log(\nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8) / ^{\log-1}$$

$$10^{10^{0,27935}} = \nu_{50^{\circ}\text{C}} + 0,8$$

$$\nu_{50^{\circ}\text{C}} = 79,112 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$w_4 = \log \log(\nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8) / ^{\log-1}$$

$$10^{w_4} = \log(\nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8) / ^{\log-1}$$

$$10^{10^{0,09989}} = \nu_{100^{\circ}\text{C}} + 0,8$$

$$\nu_{100^{\circ}\text{C}} = 17,339 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

Uzorak spada u mineralno motorno ulje sa pripadajućom gradacijom SAE 15W-40. Prema normi HRN EN ISO 3104 i tehničkim podacima Ine[1], propisana kinematička viskoznost na  $100^{\circ}\text{C}$  kreće se u granicama od  $14.0\text{--}15.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

## 5. Mjerenje u akreditiranom laboratoriju RH

Kako bi potvrdili točnost naših mjerenja, ista su se ponovila u Centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju HEP-a, akreditiranom laboratoriju za takvu vrstu mjerenja u Republici Hrvatskoj. Postupak mjerenja kinematičke viskoznosti obavio se na automatskom viskozimetru na temperaturama uzoraka 40 °C i 100 °C. Tip uređaja MP- 480 WALTER HERZOG GmbH; verzija 2,03. Mjerenje se provodilo po metodi ASTM D 445; DIN 51 562.

Tehničke karakteristike uređaja:



Frekvencija: 50-60 Hz

Snaga: 1200 W

Napon: 230 V

Dimenzije uređaja, Š\*D\*V:

350\*500\*900mm

Težina uređaja: 88kg

Uljna kupelj uređaja:

Silikonsko ulje

Dva Ubbelohde viskozimetra;

Tip: 53220/II i 53230/III

Otapalo za čišćenje

viskozimetra: Toulén

**Slika 15: Automatski viskozimetar MP-480, Walter Herzog**

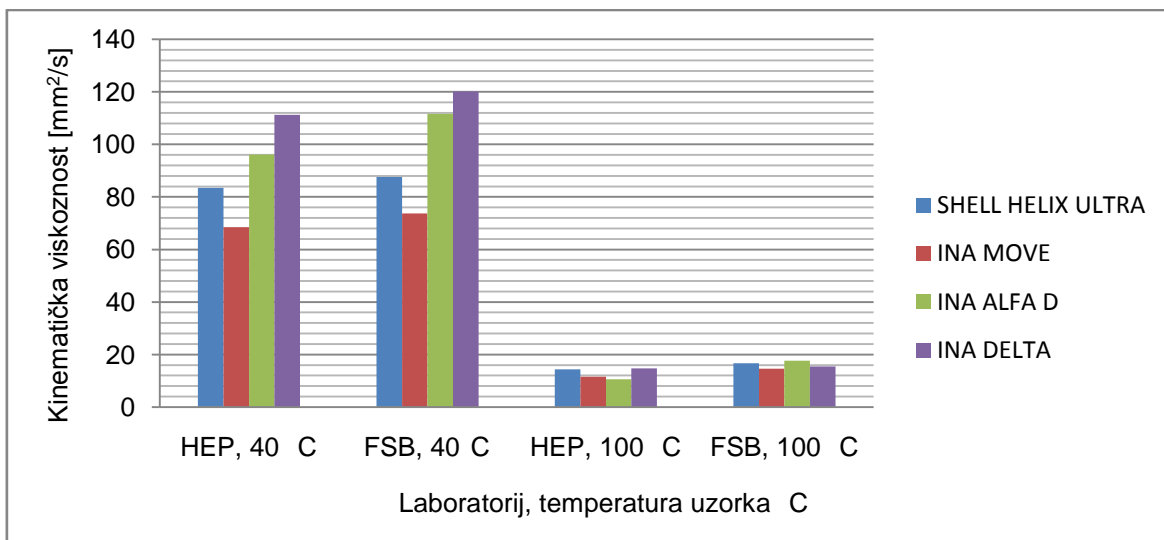
**Tablica 7: Rezultati mjerenja kinematičke viskoznosti, akreditirani laboratorij**

Vrsta uzorka	Kinematički viskozitet $\nu$ [mm <sup>2</sup> /s], na 40°C	Kinematički viskozitet $\nu$ [mm <sup>2</sup> /s], na 100°C
SHELL HELIX ULTRA 5W-40	83,45	14,38
INA MOVE SAE 5W-30	68,49	11,61
INA ALFA D SAE 20	96,19	10,54
INA DELTA SAE 15W-40	111,24	14,69

Rezultati mjerenja kinematičke viskoznosti provedeni u laboratoriju HEP-a u potpunosti se podudaraju sa granicama vrijednosti koje navode proizvođači ulja.

**Tablica 8: Usporedba rezultata laboratorijskih mjerenja**

		Temperatura °C	Kinematička viskoznost, mm <sup>2</sup> /s
Sintetska ulja			
SHELL HELIX ULTRA 5W-40	HEP	100	14,38
		40	83,45
	FSB	100	16,7
		40	87,66
INA MOVE SAE 5W-30	HEP	100	11,61
		40	68,49
	FSB	100	14,66
		40	73,76
Mineralna ulja			
INA ALFA D SAE 20	HEP	100	10,54
		40	96,19
	FSB	100	17,68
		40	111,65
INA DELTA SAE 15W-40	HEP	100	14,69
		40	111,24
	FSB	100	17,34
		40	120,11



**Dijagram 10: Usporedba rezultata laboratorijskog mjerenja**

		Sintetska ulja		Mineralna ulja	
Odstupanje mjernih rezultata	Temperatura, °C	SHELL HELIX ULTRA	INA MOVE	INA ALFA D	INA DELTA
Apsolutno, mm <sup>2</sup> /s	100	2,32	3,05	7,14	2,65
	40	4,21	5,27	15,46	8,87
Relativno	100	13,9%	20,8%	40,4%	15,3%
	40	4,8%	7,15%	13,8%	7,4%

**Tablica 9: Odstupanja rezultata FSB-a i HEP-a**

## 6. Zaključak

Provedenim mjerenjima na rotacijskom viskozimetru i na automatskom viskozimetru i usporedbom rezultata ustanovili smo kako temperatura veoma utječe na viskoznost ulja. Viskoznost kod sintetičkog ulja manje utječe na promjenu temperature što nam i prikazuje dijagram 10. Rezultati mjerenja u laboratoriju Fakulteta strojarstva i brodogradnje razlikuju se od rezultata ispitivanja u Centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju HEP-a. Uzrok takvoj razlici možemo tražiti u više činjenica. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje određivala se dinamička viskoznost, a zatim računski kinematička viskoznost, dok se u HEP-ovom laboratoriju kinematička viskoznost određivala automatski. Postupak preračunavanja dinamičke viskoznosti u kinematičku, iako slijedi svjetski priznate norme, unosi pogreške u sustav, a temelji se na dva odvojena niza preračunavanja- jedan niz računanja pomoću Waltherove formule, a drugi niz preračunavanje gustoće ulja na povišenim temperaturama. Ljudski faktor, ispravnost mjernih uređaja, točnost pomoćnih uređaja (vaga, termostatirajuća kupka, i dr.) također utječu na mjernu nesigurnost. Kod određivanja kinematske viskoznosti na automatskom viskozimetru eliminiraju se brojni mogući izvori greške koji su prisutni u mjernom nizu koji se temelji na mjerenju dinamičke viskoznosti i naknadnom preračunavanju u kinematsku viskoznost, što samim time dovodi i do preciznijih rezultata. Prema tablici 9 vidljivo je da se apsolutna vrijednost odstupanja smanjuje s porastom temperature, dok je relativno odstupanje sve veće. Razlog smanjenja apsolutne vrijednosti odstupanja je taj što viskoznost pada s porastom temperature, time i apsolutna razlika postaje manja. Relativno odstupanje na 100°C je veće nego na 40°C jer se u sustav unosi više pogrešaka pa je time i odstupanje rezultata veće.

## 7. Literatura

[1] [http://www.ina.hr/UserDocsImages/pdf/katalog\\_INA\\_maziva\\_listopad\\_2009.pdf](http://www.ina.hr/UserDocsImages/pdf/katalog_INA_maziva_listopad_2009.pdf)

[2] <http://www.shell.com/>

[3] JUGOMA, Maziva i podmazivanje, Savez jugoslavenskih društava za primjenu goriva i maziva, Zagreb, 1986.

[4] Podloge za predavanje i vježbe iz kolegija Gorivo i mazivo, Davor Ljubas, FSB Zagreb 2006.

[5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>

[6] <http://www.mapleinstrument.com/literature/RM180%20Users%20Manual%20Maple%20Version.pdf>

[7] DIN Taschenbuch 57 – Mineralöle und Brennstoffe 3, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, Köln 1993

[8] Utjecaj razrjeđenja motornih ulja gorivom na njihovu viskoznost, plamište i gorište, D. Ljubas, H. Krpan, I. Matanović, NAFTA 61 (2) 80-84 (2010)

[9] Mehanika fluida 1, Z. Virag, odabrana poglavlja, primjeri i zadaci, FSB Zagreb, 2007.